

doi: 10.13745/j.esf.2015.01.030

日本 M_w 9.0 级大地震前后华北和东北地区现今构造应力作用调整过程与研究意义探讨

谭成轩^{1,2}, 胡秋韵^{3,*}, 张 鹏^{1,2}, 丰成君^{1,2}, 秦向辉^{1,2}

1. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081
2. 国土资源部 新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081
3. 中国地质调查局, 北京 100037

TAN Chengxuan^{1,2}, HU Qiuyun^{3,*}, ZHANG Peng^{1,2}, FENG Chengjun^{1,2}, QIN Xianghui^{1,2}

1. Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China
2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China
3. China Geological Survey, Beijing 100037, China

TAN Chengxuan, HU Qiuyun, ZHANG Peng, et al. Present tectonic stress adjustment process before and after Japan M_w 9.0 earthquake in North and Northeast China and its research significance. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 345-359

Abstract: In order to discuss present tectonic stress adjustment process before and after Japan M_w 9.0 earthquake in North and Northeast China and its research significance, the measurement of present in-situ absolute crustal stress state (including magnitude and orientation) and the real-time monitoring of crustal stress values and GPS measuring in North and Northeast China were carried out. The research results show that the adjusting periods of the tensile effect triggered by Japan earthquake coseismic displacement in Shandong peninsula, north region of North China and Northeast China are about 6 months (the adjustment ended about in September 2011), 15 months (the adjustment ended about in June 2012) and 26 months (the adjustment ended about in May 2013), respectively, and that the adjusting cycle of the tensile effect is proportional to the size of coseismic displacement. In this adjustment process, the conversion of the regional tectonic stress action way and tectonic stress field may have happened, which may cause the major geological events (such as earthquakes and so on). The earthquakes, such as M_s 4.8 on May 28, 2012, M_s 3.2 on May 29, 2012, M_s 4.0 on June 18, 2012, M_s 3.3 on August 26, 2012, and M_s 3.0 on January 11, 2013, in Tangshan and its around region, may be triggered by the conversion in the northern part of North China, and the earthquake swarm in Songyuan city in Jilin Province since October 31, 2013 may be caused by the conversion in Northeast China, rather than small earthquakes before a strong earthquake.

Key words: present in-situ absolute crustal stress state measuring and crustal stress value real-time monitoring; GPS measuring; adjustment period of tensile effect; the conversion of the regional tectonic stress action way and tectonic stress field; Songyuan earthquake swarm

摘 要:为了探讨日本 M_w 9.0 级大地震前后华北和东北地区现今构造应力作用调整过程与研究意义,对华北和东北地区进行原位现今地应力绝对测量与实时监测、GPS 测量,结果表明:日本大地震在山东半岛、华北北部地区和东北地区所诱发同震位移引起的张性效应调整周期分别约为 6 个月(即调整结束时间大约在 2011 年 9 月)、15 个月(即调整结束时间大约在 2012 年 6 月)和 26 个月(即调整结束时间大约在 2013 年 5 月),张性效应调整周期与同震位移大小成正比。在这种调整过程中,往往表现出区域现今构造应力作用方

收稿日期:2014-04-03;修回日期:2014-04-25

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项“我国东部沿海核电站区域地壳稳定性与地质灾害研究”(201211096);中国地质调查局项目“首都圈地区关键构造部位深孔地应力测量监测与地质安全评价”(12120113012100)

作者简介:谭成轩(1964—),男,研究员,博士生导师,地质力学专业,主要从事构造应力场、区域地壳稳定性评价、地质灾害等研究工作。E-mail: tanchengxuan@tom.com

* 通讯作者简介:胡秋韵(1983—),女,工程师,主要从事地质灾害与地质环境研究。E-mail: hqiuyun@mail.cgs.gov.cn

式和构造应力场转换,并可能伴随重大地质事件(如地震等)的发生。2012 年 5 月 28 日和 29 日、6 月 18 日、8 月 26 日及 2013 年 1 月 11 日在唐山及其周围地区分别发生的 4.8 级、3.2 级、4.0 级、3.3 级和 3.0 级地震与华北北部地区构造应力作用方式和构造应力场转换有关,而 2013 年 10 月 31 日以来在吉林省松原市发生的地震群应与东北地区构造应力作用方式和构造应力场转换有关,而非一个大地震前的小震群。

关键词:原位现今地应力绝对测量与实时监测;GPS 测量;张性效应调整周期;构造应力作用方式和构造应力场转换;松原震群

中图分类号:P553 **文献标志码:**A **文章编号:**1005 - 2321(2015)01 - 0345 - 15

0 引言

在漫长的地质历史演化时间尺度,构造变形、沉积建造等研究表明,不同地质历史时期导致区域构造运动的构造应力作用具有复杂的演化过程,构造强烈变形期区域构造应力往往以挤压作用为主,而沉积建造期区域构造应力往往以拉张作用为主,为此,人们运用不同的构造期次(如印支期、燕山期、喜山期等)及其间隔来表征特定地区不同地质时期构造作用的特点。在现代构造地质作用时间长度,导致区域构造运动的现代构造应力作用同样具有复杂的演化过程^[1-3],通过现今原位地应力状态绝对测量和地应力相对大小实时监测,结合震源机制解、GPS 测量、断层位移测量等资料分析,可以揭示现代构造应力作用演化过程,对于断裂

活动性、地震地质等研究具有重要意义。

2011 年 3 月 11 日日本本州东海岸附近海域(北纬 38.1°,东经 142.6°)发生的 M_w 9.0 级大地震对中国东部大陆产生了较大的影响,根据华北和东北地区地表 GPS 同震位移测量表明,在该重大地质事件发生过程中,由于太平洋板块构造的强烈俯冲作用导致位于上盘的中国华北和东北地区产生了近东西向的张性拉张效应(图 1),其反映的张性应力环境与华北和东北地区近东西向现代构造应力挤压环境具有显著差异。

为了揭示日本 M_w 9.0 级大地震前后华北和东北地区现代构造应力作用的差异和演化过程,探讨其研究意义,本文将从华北和东北地区现代构造应力场特征、现今原位地应力绝对测量和地应力相对大小实时监测等进行研究。

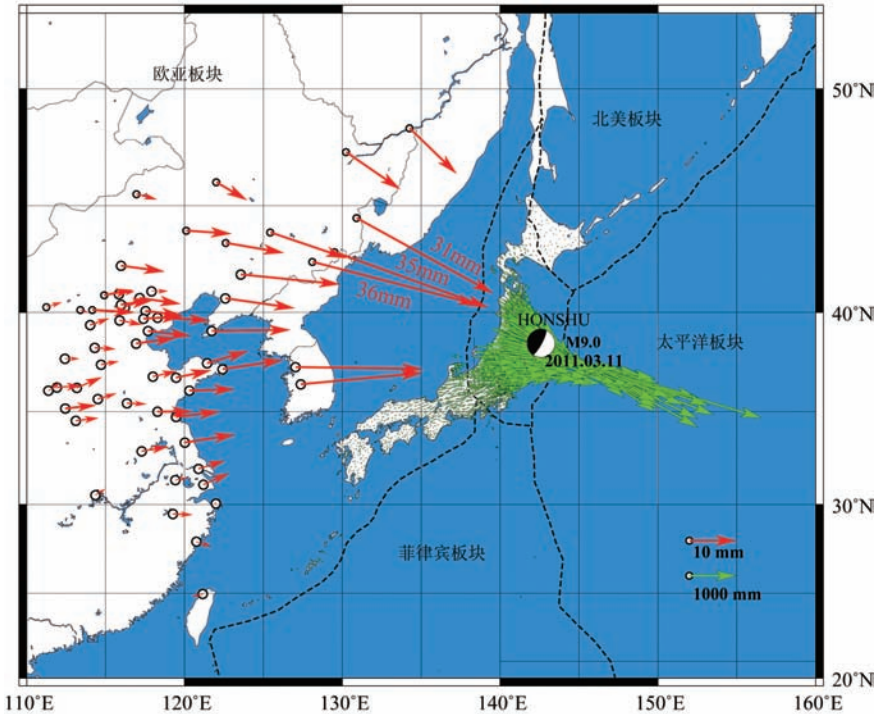


图 1 日本 M_w 9.0 级大地震在中国东部大陆华北和东北地区诱发的 GPS 同震水平位移^①
Fig. 1 The GPS co-seismic horizontal displacement caused by Japan M_w 9.0 earthquake in North and Northeast China^①

① http://www.cea.gov.cn/manage/html/8a8587881632fa5c0116674a018300cf/_content/11_03/22/1300780240530.html 修编。

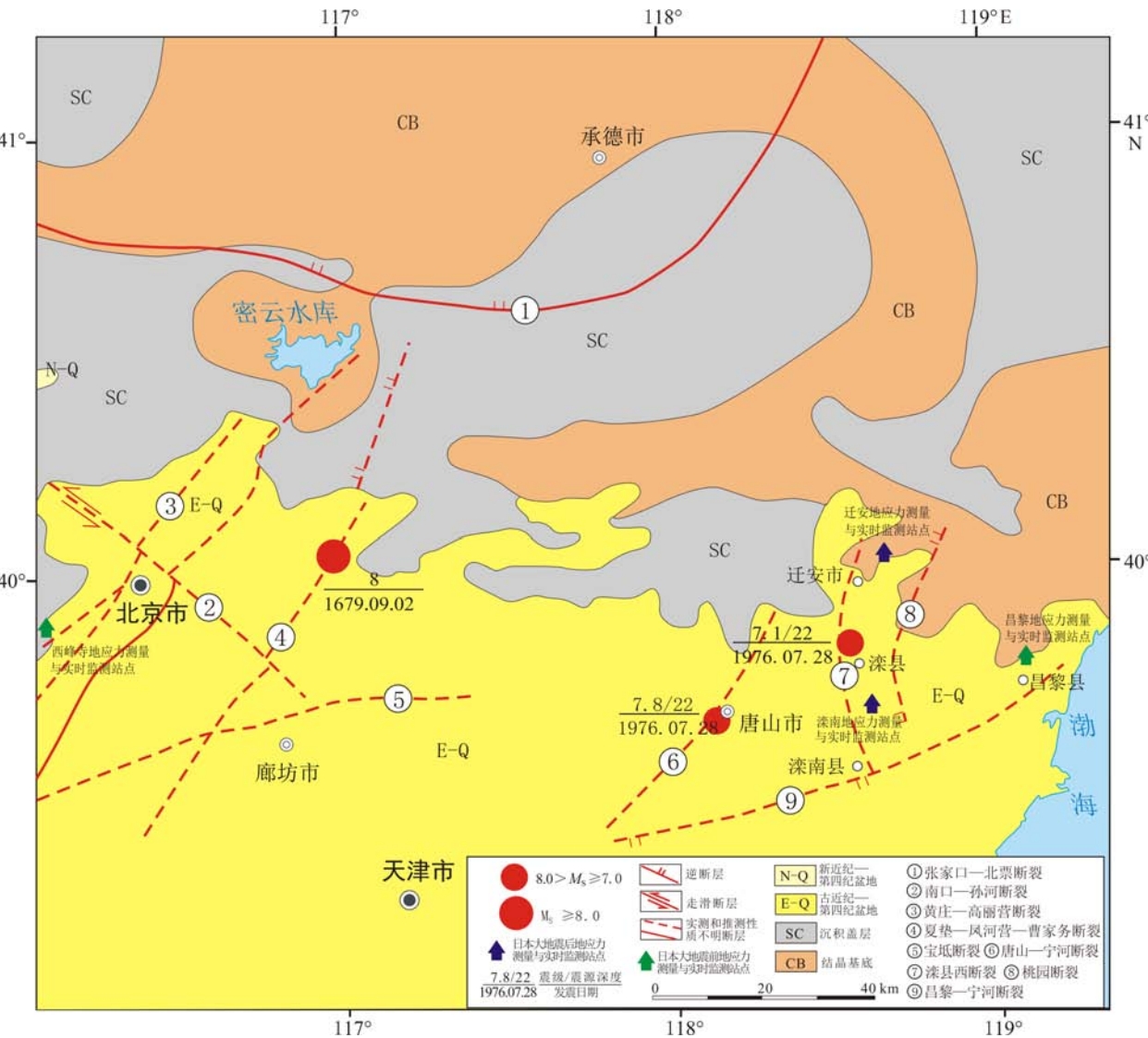


图2 华北地区地震构造及地应力测量与实时监测站点分布图
(据文献[5]修编)

Fig. 2 The sketch map for seismotectonics and crustal stress measuring and real-time monitoring station distribution in North China

1 日本 M_w 9.0 级大地震前华北和东北地区现代构造应力作用特征

为了揭示日本 M_w 9.0 级大地震前华北和东北地区现代构造应力作用特征,首先分析华北和东北地区现代构造应力场特征,其次介绍关键构造部位现今原位地应力绝对测量结果。

1.1 华北和东北地区现代构造应力场特征

谢富仁等^[4]和“中国大陆地壳应力环境基础数据库”^①综合多种研究方法和成果,编制出版或发布了华北和东北地区现代构造应力场图,结果表明华北和东北地区区域现代最大水平主压应力优势方位

为 NEE 方向。
1.2 关键构造部位现今原位地应力绝对测量结果分析

在日本 M_w 9.0 级大地震发生之前较短的时间内,华北地区开展的具有区域代表意义的关键构造部位现今原位地应力绝对测量可以以河北省昌黎县和北京西峰寺为代表(图 2),下面分别对其主要结果予以简述。

1.2.1 河北省昌黎县现今原位地应力绝对测量结果分析

该现今原位地应力绝对测量钻孔位于河北省昌

① <http://www.eq-icd.cn/webgis/picture.htm>.

黎县城北侧的碣石山南坡坡脚(GPS:E119°09′03″, N39°44′37″)(图2), 现今原位地应力绝对测量目标层岩性为燕山晚期中细粒花岗岩, 钻孔深度为500 m。2009年10月在该钻孔随深度进行了系统的水压致裂原位地应力绝对测量^[6](图3~5, 表1)。从原位地应力绝对测量结果可以看出, 日本 M_w 9.0级大地震前昌黎及其周围地区最大水平主压应力平均优势方位为NEE方向, 水平主应力在测量深度范围起主导作用。

1.2.2 北京西峰寺现今原位地应力绝对测量结果分析

该现今原位地应力绝对测量钻孔位于北京市门头沟区永定镇国土资源部西峰寺培训中心西北侧

(GPS:E116°04′16″, N39°53′05″)(图2), 岩性为石炭纪一二叠纪的砂岩、粉砂岩夹泥岩和煤系地层, 钻孔深度为800 m。2010年12月在该钻孔随深度进行了系统的水压致裂原位地应力绝对测量^[6](表2, 图6)。需要说明的是, 为了节约篇幅, 文中略去了水压致裂原位地应力绝对测量压力-时间曲线图和最大水平主应力方向印模试验结果图, 而仅给出水压致裂原位地应力绝对测量压力参数及计算结果(表2)和主应力状态随深度变化趋势(图6)。从原位地应力绝对测量结果可以看出, 日本 M_w 9.0级大地震前西峰寺及其周围地区最大水平主压应力平均优势方位为近EW方向, 水平主应力在测量深度范围起主导作用。

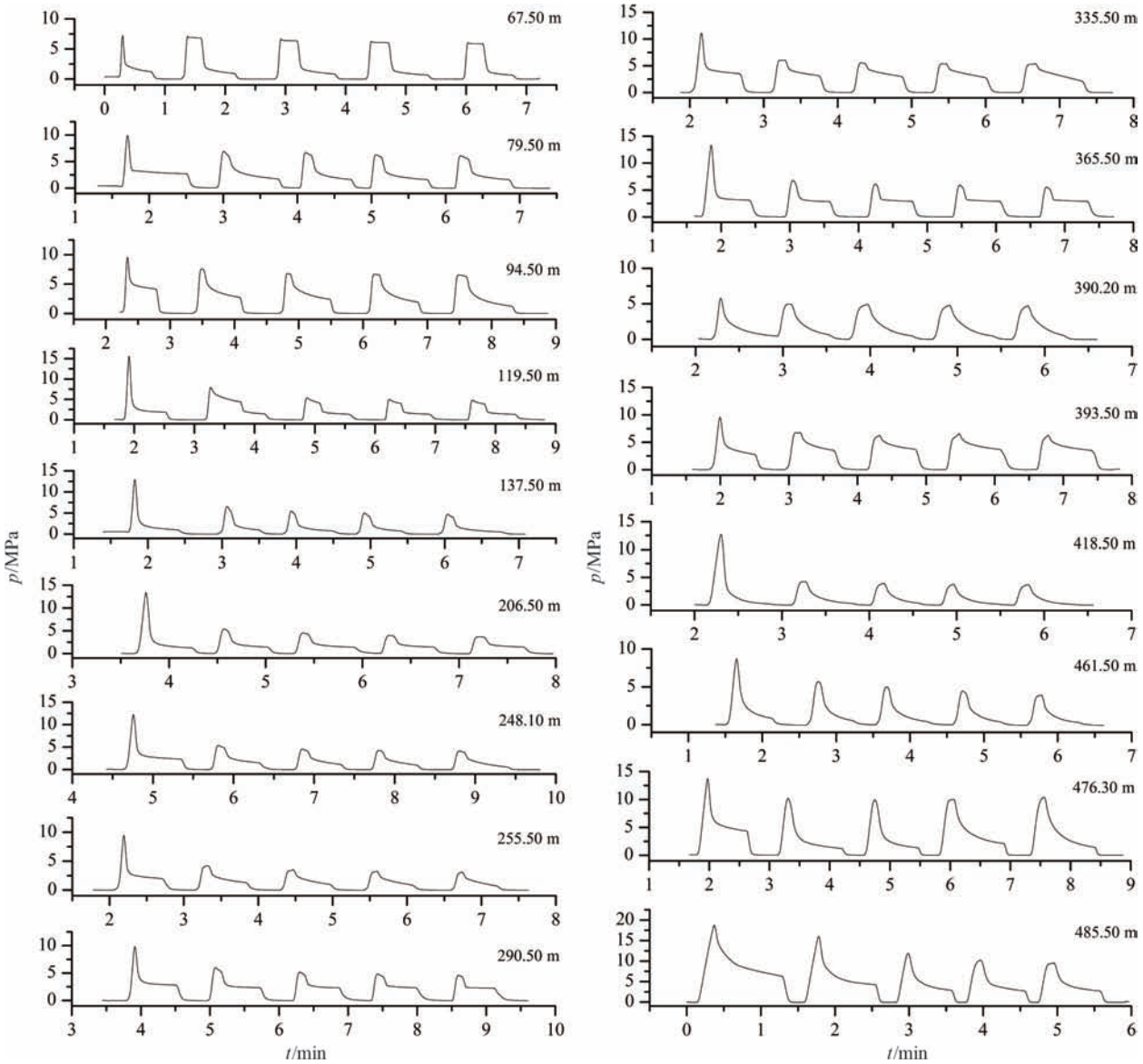


图3 河北省昌黎县水压致裂原位地应力绝对测量压力-时间曲线
Fig. 3 The pressure-time curve of in-situ absolute crustal stress measuring by hydrofracturing method at Changli County in Hebei Province

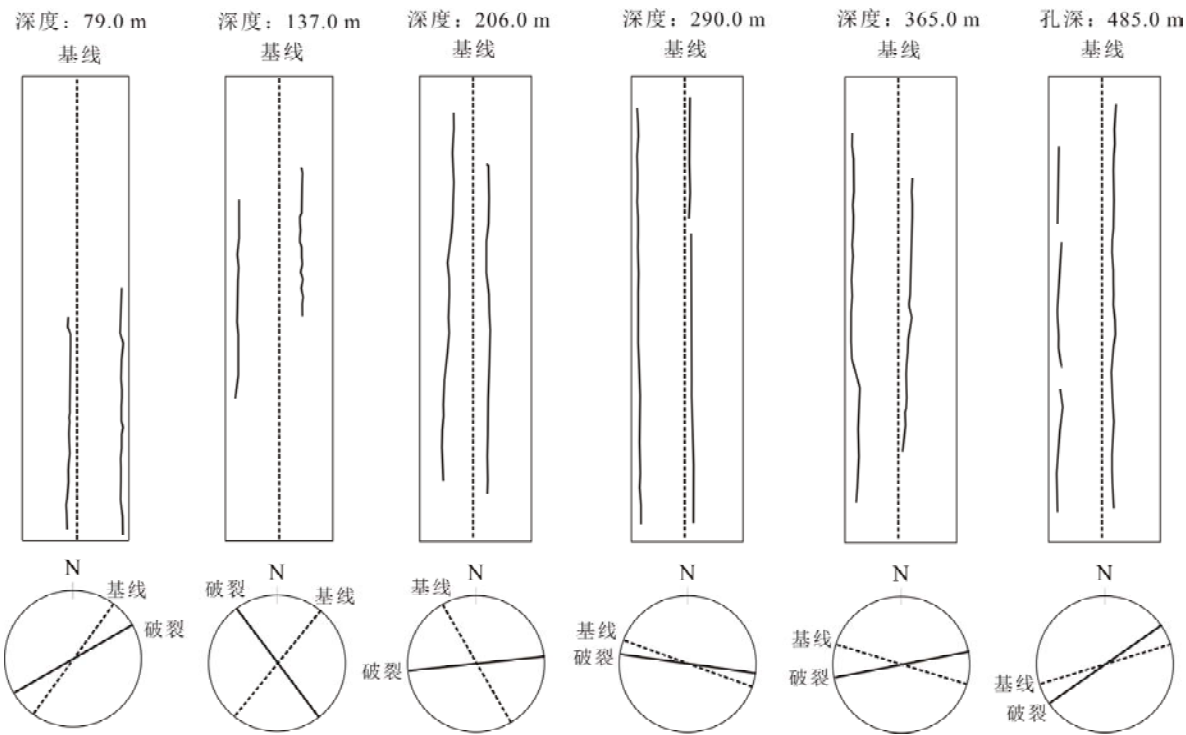


图 4 河北省昌黎县水压致裂原位地应力绝对测量最大水平主应力方向印模试验结果

Fig.4 The impression experiment result for determining the maximum horizontal principal compressive stress direction in in-situ absolute crustal stress measuring by hydrofracturing method at Changli County in Hebei Province

表 1 河北省昌黎县水压致裂原位地应力绝对测量压力参数及计算结果

Table 1 The hydrofracturing parameters and its calculating results of in-situ absolute crustal stress measuring by hydrofracturing method at Changli County in Hebei Province

测段 序号	测段中心 深度/m	压裂参数/MPa						主应力大小/MPa			S_H 方向/(°)
		p_H	p_o	p_b	p_r	p_s	T	S_H	S_h	S_v	
1	67.50	0.68	0.58	11.16	6.73	4.57	4.43	6.40	4.57	1.79	
2	79.50	0.80	0.70	12.25	7.43	4.63	4.82	5.76	4.63	2.11	N60°E
3	94.50	0.95	0.85	13.41	7.36	5.62	6.05	8.65	5.62	2.50	
4	119.50	1.20	1.10	19.78	6.11	3.75	13.67	4.04	3.75	3.17	
5	137.50	1.38	1.28	16.76	6.58	4.14	10.18	4.56	4.14	3.64	N37°W
6	206.50	2.07	1.97	18.24	6.00	5.20	12.24	7.63	5.20	5.47	N84°E
7	248.10	2.48	2.38	16.94	6.62	5.56	10.32	7.68	5.56	6.57	
8	255.50	2.56	2.46	13.59	5.64	5.17	7.95	7.41	5.17	6.77	
9	290.50	2.91	2.81	14.02	7.71	6.18	6.31	8.02	6.18	7.70	N82°W
10	335.50	3.36	3.26	16.03	8.46	7.75	7.57	11.53	7.75	8.89	
11	365.50	3.66	3.56	18.16	9.23	7.34	8.93	9.23	7.34	9.69	N79°E
12	390.20	3.90	3.80	10.41	7.94	7.13	2.47	9.65	7.13	10.34	
13	393.50	3.94	3.84	14.26	9.75	9.18	4.51	13.95	9.18	10.43	
14	418.50	4.19	4.09	17.42	7.62	6.66	9.0	8.27	6.66	11.09	
15	461.50	4.62	4.52	13.87	9.15	7.62	4.72	9.19	7.62	12.23	
16	476.30	4.76	4.66	19.34	13.92	9.87	5.42	11.03	9.87	12.62	
17	485.50	4.86	4.76	24.65	13.61	10.62	11.04	13.49	10.62	12.87	N55°E

注： p_b —岩石破裂压力； p_r —破裂面重张压力； p_s —破裂面瞬时关闭压力； p_H —静水柱压力； p_o —孔隙压力； T —岩石抗拉强度； S_H —最大水平主应力； S_h —最小水平主应力； S_v —根据上覆岩石埋深计算的垂向主应力（岩石容重 2.65 g/cm³）。

表 2 北京西峰寺水压致裂原位地应力绝对测量压力参数及计算结果
Table 2 The hydrofracturing parameters and its calculating results of in-situ absolute crustal stress measuring by hydrofracturing method at Xifengsi in Beijing

测段 序号	测段中心 深度/m	压裂参数/MPa						主应力大小/MPa			S_H 方向/(°)
		p_H	p_o	p_b	p_r	p_s	T	S_H	S_h	S_v	
1	180.50	1.81	1.01	10.09	7.77	5.61	2.32	8.05	5.61	4.78	N84°E
2	231.50	2.32	1.52	19.81	8.72	5.36	11.09	5.84	5.36	6.13	
3	257.03	2.57	1.77	30.80	7.75	7.53	23.05	13.07	7.53	6.81	
4	260.73	2.61	1.81	12.55	7.87	7.61	4.68	13.15	7.61	6.91	
5	261.15	2.61	1.81	17.00	10.18	6.23	6.82	6.70	6.23	6.92	
6	273.50	2.74	1.94	19.35	12.36	6.90	6.99	6.40	6.90	7.25	
7	300.50	3.01	2.21	20.97	10.17	9.66	10.80	16.60	9.66	7.96	N84°E
8	334.68	3.35	2.55	21.47	14.19	14.67	7.28	27.27	14.67	8.87	
9	382.33	3.82	3.02	32.30	18.49	14.50	13.81	21.99	14.50	10.13	
10	416.50	4.17	3.37	18.98	14.59	12.71	4.39	20.17	12.71	11.04	
11	429.50	4.30	3.50	29.36	17.26	17.85	12.10	32.79	17.85	11.38	
12	532.78	5.33	4.53	33.39	20.97	19.98	12.42	34.44	19.98	14.12	
13	568.73	5.69	4.89	25.86	16.12	16.22	9.74	27.65	16.22	15.07	N79°W
14	611.73	6.12	5.32	25.10	21.16	19.36	3.94	31.60	19.36	16.21	
15	657.73	6.58	5.78	20.20	14.15	13.42	6.05	20.33	13.42	17.43	
16	700.35	7.00	6.20	13.53	10.69	10.48	2.84	14.55	10.48	18.56	
17	730.43	7.30	6.50	28.85	20.15	23.20	8.70	42.95	23.20	19.36	

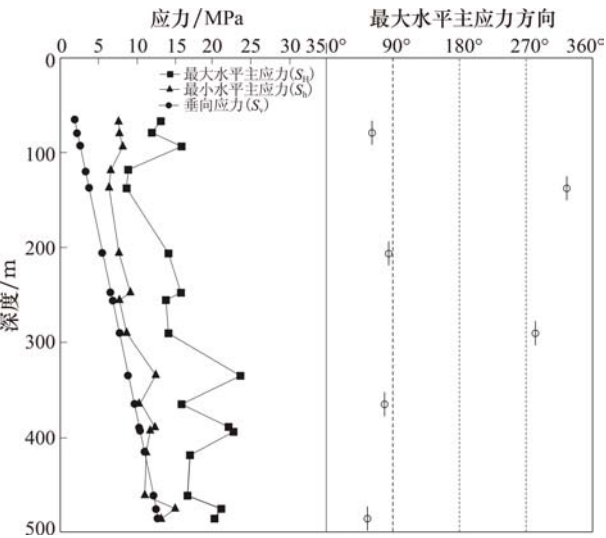


图 5 河北省昌黎县主应力状态随深度变化趋势
Fig. 5 The variation trend of principal stress state at Changli County in Hebei Province

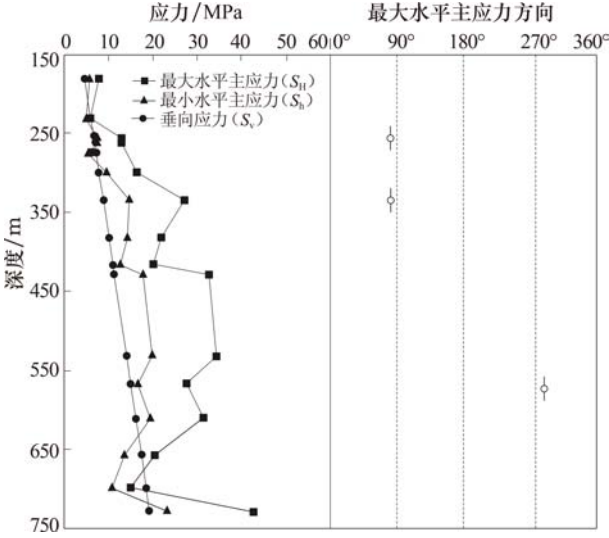


图 6 北京西峰寺主应力状态随深度变化趋势
Fig. 6 The variation trend of principal stress state at Xifengsi in Beijing

2 日本 M_w 9.0 级大地震后华北和东北地区现今构造应力作用特征

为了揭示日本 M_w 9.0 级大地震后华北和东北地区现今构造应力作用特征,首先进行河北省昌黎县地应力实时监测结果分析,其次介绍关键构造部位深孔现今原位地应力绝对测量结果。

2.1 河北省昌黎县地应力实时监测结果分析

河北省昌黎县地应力实时监测台站于 2011 年 12 月 25 日开始获取有效地应力监测数据,下面对其实时监测数据进行讨论分析。

依据 1976 年唐山地震发震断裂、昌黎地应力实时监测台站、燕山山脉三者之间的空间相对位置(图 2、7),考虑断裂活动方式、构造地貌、地质体刚性特征等^[5,7-9],通过 2011 年 3 月 11 日日本 9.0 级大地震发

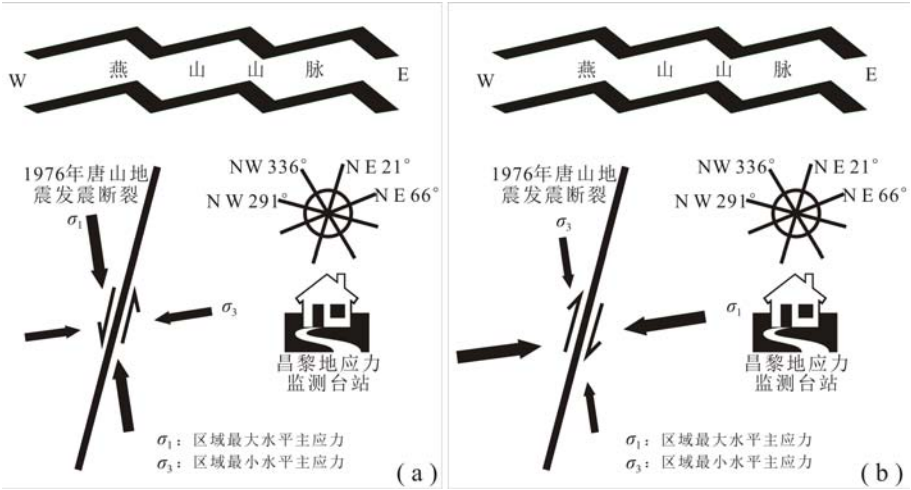


图 7 1976 年唐山地震震断裂、昌黎地应力监测台站、燕山山脉三者之间的空间相对位置及构造应力作用分析示意图
Fig. 7 The sketch map showing the relative spatial position of causative fracture of Tangshan earthquake in 1976, real-time monitoring station at Changli and Yanshanian mountain and the tectonic stress action way
(a)2011 年 12 月 25 日—2012 年 6 月 5 日;(b)2012 年 6 月 6 日以来。

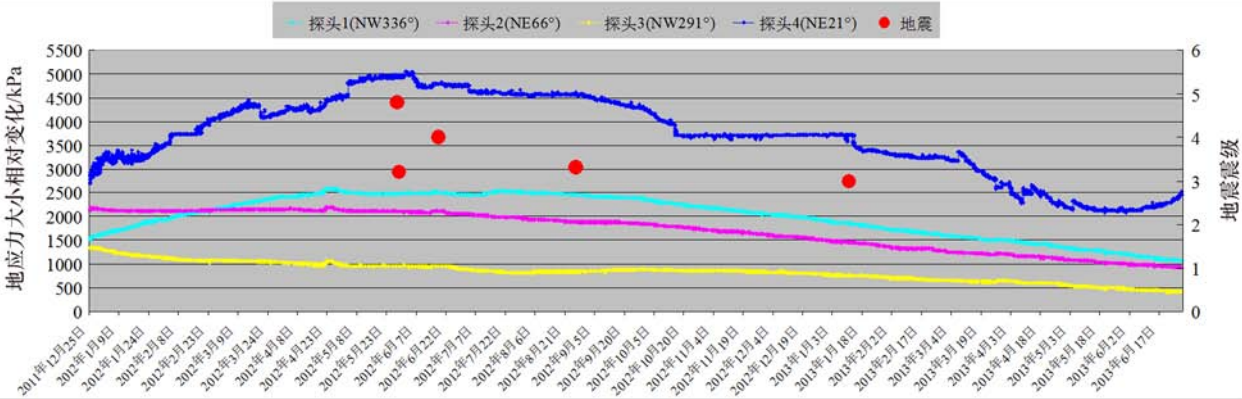


图 8 河北省昌黎县地应力实时监测台站 2011 年 12 月 25 日—2013 年 6 月 28 日地应力大小相对变化
Fig. 8 The crustal stress magnitude relative variation from December 25, 2011 to June 28, 2013 at Changli real-time monitoring station in Hebei Province

生后昌黎地应力实时监测台站地应力监测结果分析表明(图 8):(1)2011 年 12 月 25 日—2012 年 6 月 5 日期间昌黎及其周围地区最大水平主压应力为近南北方向,NNE 向断裂由震前的压性顺时针扭动变为震后的张性逆时针扭动。由于北部燕山山脉刚性结晶基底的阻挡^[9],考虑该台站的空间相对位置,必然导致该台站 NE21°方向探头地应力增加,而近东西向表现为拉张效应(图 7(a)),这与日本 9.0 级大地震所诱发的华北地区同震位移所反映的区域构造作用效应相吻合。(2)2012 年 6 月 6 日以来,昌黎台站地应力监测结果反映昌黎及其周围地区最大水平主压应力为近东西方向(图 7(b)),区域构造应力作用恢复到日本 9.0 级大地震之前华北地区现代最大水平主应力方向,表现为 NNE 向断裂压性顺时针扭动,该台站 NE21°方

向探头地应力减小。昌黎地应力实时监测结果所反映的区域构造应力场的演化过程与下面现今原位地应力绝对测量、GPS 测量^[10-12]等研究成果基本一致。

2.2 华北和东北地区关键构造部位现今原位地应力绝对测量结果分析

在日本 M_w 9.0 级大地震发生之后,华北和东北地区开展的具有区域代表意义的关键构造部位现今原位地应力绝对测量可概述如下。同时为了节约篇幅,仅给出水压致裂原位地应力绝对测量压力参数及计算结果和主应力状态随深度变化趋势。

2.2.1 山东省平度市现今原位地应力绝对测量结果分析

该现今原位地应力绝对测量钻孔位于山东省平度市崔召镇(GPS:E120°01'00",N36°51'53")(图 9),

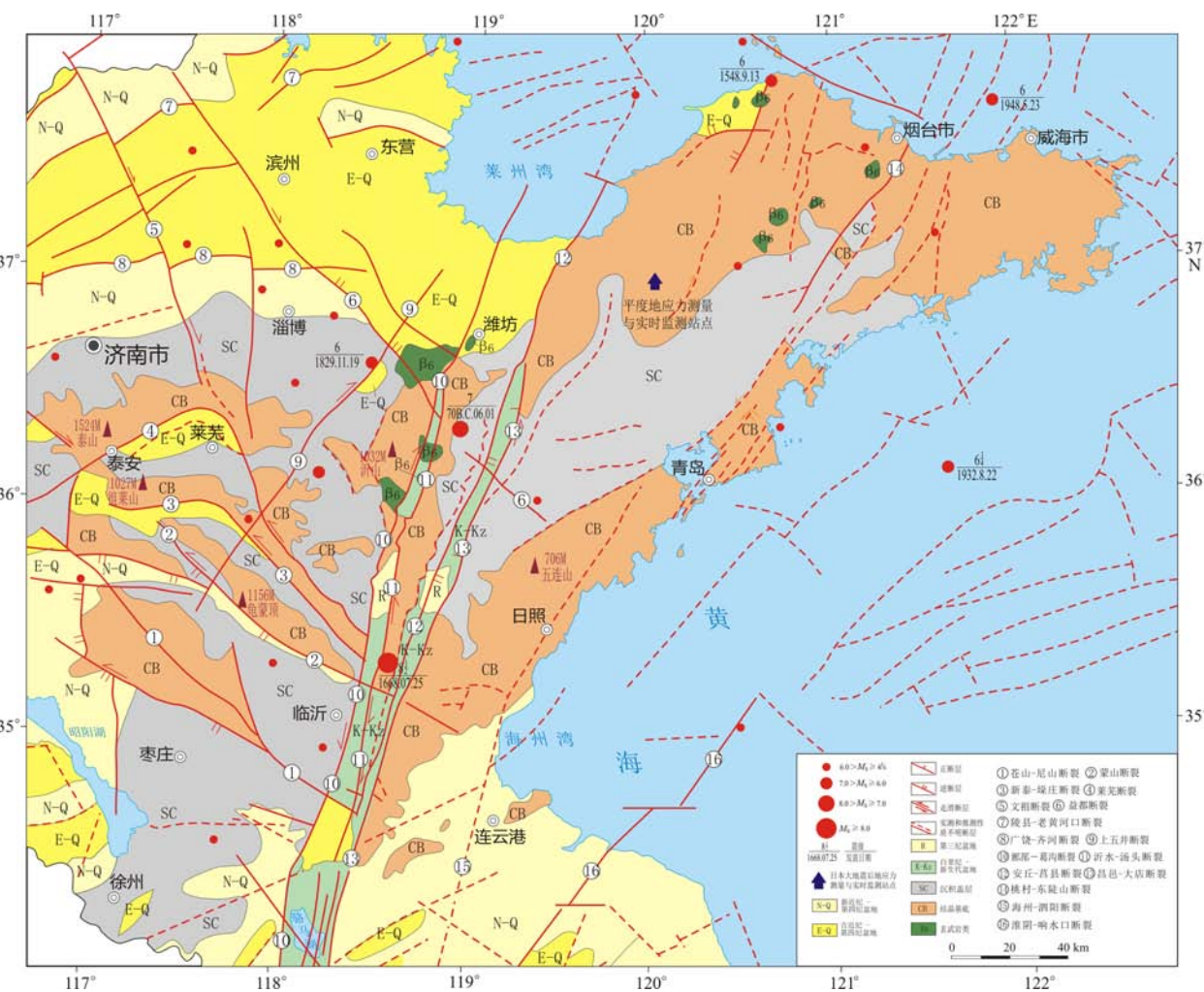


图9 山东半岛地震构造及地应力测量与实时监测站点位置图
(据文献[5]修编)

Fig. 9 The sketch map for seismotectonics and crustal stress measuring and real-time monitoring station location in Shandong peninsula

现今原位地应力绝对测量目标层岩性为燕山晚期中细粒花岗岩,钻孔深度为 600 m。2011 年 9 月 16—20 日在该钻孔随深度进行了系统的水压致裂原位地应力绝对测量^[6,11](表 3,图 10)。从原位地应力绝对测量结果可以看出,日本 M_w 9.0 级大地震后 6 个月左右的时间,平度及其周围地区最大水平主压应力平均优势方位(近 EW 方向)已基本调整恢复到日本大地震前的现代地应力环境。值得注意的是,最大、最小水平主应力和垂直应力大小差异不大,尤其是最大水平主应力和垂直应力大小相近,最大剪应力较小,这也说明日本大地震在山东半岛诱发的拉张效应调整基本结束或结束不久。

2.2.2 河北省滦南县马城镇现今原位地应力绝对测量结果分析

该现今原位地应力绝对测量钻孔位于河北省滦

南县马城镇(GPS: E118° 47′ 35″, N39° 38′ 20″)(图 2),现今原位地应力绝对测量目标层岩性为太古宙黑云变粒岩、黑云角闪变粒岩、斜长角闪岩、角闪斜长片麻岩、黑云角闪斜长片麻岩夹磁石英岩,钻孔深度为 930 m。2012 年 6 月 15—25 日在该钻孔随深度进行了系统的水压致裂原位地应力绝对测量^[6](表 4,图 11)。从原位地应力绝对测量结果可以看出,日本 M_w 9.0 级大地震后 15 月左右的时间,滦南县及其周围地区最大水平主应力平均优势方位(近 EW 方向)已基本调整恢复到日本大地震前的现代地应力环境。值得注意的是,最大、最小水平主应力和垂直应力大小差异不大,尤其是最大水平主应力和垂直应力大小相近,最大剪应力较小,这也说明日本大地震在华北地区诱发的拉张效应调整基本结束或结束不久。

表 3 山东省平度市水压致裂现今原位地应力绝对测量压力参数及计算结果

Table 3 The hydrofracturing parameters and its calculating results of in-situ absolute crustal stress measuring by hydrofracturing method at Pingdu City in Shandong Province

测段 序号	测段中心 深度/m	压裂参数/MPa						主应力大小/MPa			S_H 方向/(°)
		p_H	p_o	p_b	p_r	p_s	T	S_H	S_h	S_v	
1	65.50	6.09	2.18	3.11	0.66	0.56	2.98	2.87	2.18	1.74	N80°W
2	101.00	13.70	4.2	5.57	1.01	0.91	8.13	6.05	4.20	2.68	
3	109.40	7.62	4.11	5.64	1.09	0.99	1.98	5.81	4.11	2.90	
4	166.80	11.79	5.00	6.02	1.67	1.57	5.77	7.41	5.03	4.42	
5	201.40	9.11	4.73	6.51	2.01	1.91	2.6	5.77	4.73	5.34	N87°W
6	212.00	14.43	5.39	6.20	2.12	2.02	8.23	7.95	5.39	5.62	
7	220.10	10.42	6.30	7.81	2.20	2.10	2.61	8.99	6.30	5.83	
8	236.60	10.85	4.51	5.72	2.37	2.27	5.13	5.54	4.51	6.27	
9	254.60	11.81	6.32	7.71	2.55	2.45	4.1	8.80	6.32	6.75	N81°E
10	268.00	11.95	6.19	7.18	2.68	2.58	4.77	8.81	6.19	7.10	
11	314.00	10.68	6.48	8.10	3.14	3.04	2.58	8.50	6.48	8.32	
12	337.80	16.85	8.83	11.98	3.38	3.28	4.87	11.23	8.83	8.95	
13	346.00	11.37	7.29	8.50	3.46	3.36	2.87	10.01	7.29	9.17	N88°W
14	362.60	11.23	4.80	5.21	3.63	3.53	6.02	5.66	4.80	9.61	
15	372.50	11.17	6.53	7.48	3.73	3.63	3.69	8.48	6.53	9.87	
16	384.60	9.40	7.74	8.28	3.85	3.75	1.12	11.19	7.74	10.19	
17	410.40	14.36	6.43	7.15	4.10	4.00	7.21	8.14	6.43	10.88	N70°E
18	430.70	13.84	9.33	10.73	4.31	4.21	3.11	13.05	9.33	11.41	
19	454.90	13.77	6.95	7.89	4.55	4.45	5.88	8.51	6.95	12.05	
20	463.50	12.56	7.78	8.47	4.64	4.54	4.09	10.33	7.78	12.28	
21	473.00	16.82	7.39	8.53	4.73	4.63	8.29	9.01	7.39	12.53	
22	481.60	15.05	8.64	9.71	4.82	4.72	5.34	11.49	8.64	12.76	
23	508.10	17.14	10.90	12.86	5.08	4.98	4.28	14.86	10.90	13.46	
24	517.90	14.56	8.59	9.34	5.18	5.08	5.22	11.35	8.59	13.72	
25	542.00	15.17	7.78	8.19	5.42	5.32	6.98	9.83	7.54	14.36	

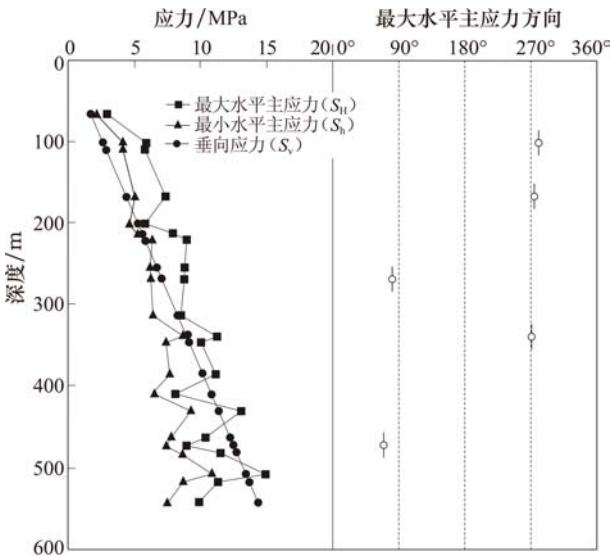


图 10 山东省平度市主应力状态随深度变化趋势

Fig. 10 The variation trend of principal stress state at Pingdu City in Shandong Province

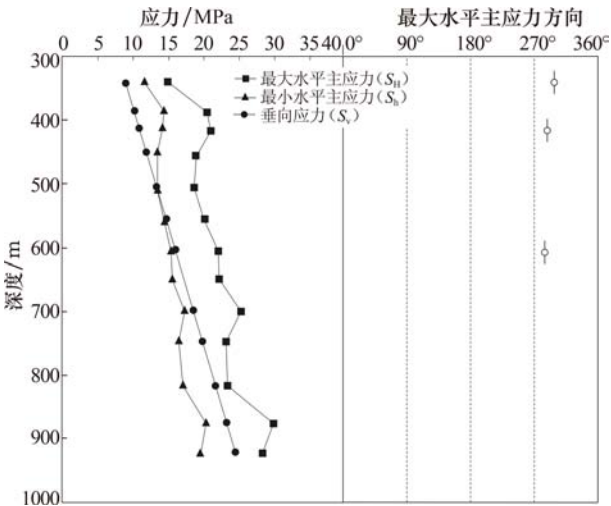


图 11 河北省滦南县主应力状态随深度变化趋势

Fig. 11 The variation trend of principal stress state at Luannan County in Hebei Province

2.2.3 河北省迁安市现今原位地应力绝对测量结果分析

该现今原位地应力绝对测量钻孔位于河北省迁安市扣庄乡(GPS:E118°48'26",N40°01'05")(图 2),现今原位地应力绝对测量目标层岩性为太古宙石英岩和辉绿岩脉,钻孔深度为 600 m。2013 年 8 月 6—12 日在该钻孔随深度进行了系统的水压致裂原位地应力绝对测量^[6](表 5,图 12)。从原位地应力

绝对测量结果可以看出,日本 M_w 9.0 级大地震后经过约 29 月的区域构造应力作用调整,最大、最小水平主应力和垂直应力大小差异明显,最大剪应力较 2012 年 6 月河北省滦南县明显增大,水平主应力在测量深度范围起主导作用,迁安及其周围地区最大水平主压应力平均优势方位(近 EW 方向)已完全调整恢复到日本大地震前的现代地应力环境。

表 4 河北省滦南县水压致裂现今原位地应力绝对测量压力参数及计算结果

Table 4 The hydrofracturing parameters and its calculating results of in-situ absolute crustal stress measuring by hydrofracturing method at Luannan County in Hebei Province

测段 序号	测段中心 深度/m	压裂参数/MPa						主应力大小/MPa			S_H 方向/(°)
		p_H	p_o	p_b	p_r	p_s	T	S_H	S_h	S_v	
1	340.00	3.40	3.36	21.50	16.26	11.53	5.24	14.97	11.53	9.01	N60°W
2	386.00	3.86	3.82	24.42	18.82	14.38	5.60	20.50	14.38	10.23	
3	413.50	4.14	4.10	30.56	17.59	14.22	12.97	20.97	14.22	10.96	
4	450.78	4.51	4.47	28.07	16.65	13.38	11.42	19.02	13.38	11.95	
5	506.00	5.06	5.02	28.19	16.89	13.49	11.30	18.56	13.49	13.41	N70°W
6	557.00	5.57	5.53	25.46	17.55	14.37	7.91	20.03	14.37	14.76	
7	605.00	6.05	6.01	24.79	18.05	15.40	6.74	22.14	15.40	16.03	
8	649.26	6.49	6.45	26.20	17.97	15.49	8.23	22.05	15.49	17.21	
9	700.00	7.00	6.96	28.83	19.61	17.29	9.22	25.30	17.29	18.55	N74°W
10	748.00	7.48	7.44	29.97	19.00	16.48	10.97	23.00	16.48	19.82	
11	818.00	8.18	8.14	27.71	19.76	17.04	7.95	23.22	17.04	21.68	
12	874.59	8.75	8.71		22.28	20.27		29.82	20.27	23.18	
13	922.44	9.22	9.18	27.70	20.96	19.46	6.84	28.24	19.46	24.44	

表 5 河北省迁安市水压致裂现今原位地应力绝对测量压力参数及计算结果

Table 5 The hydrofracturing parameters and its calculating results of in-situ absolute crustal stress measuring by hydrofracturing method at Qianan City in Hebei Province

测段 序号	测段中心 深度/m	压裂参数/MPa						主应力大小/MPa			S_H 方向/(°)
		p_H	p_o	p_b	p_r	p_s	T	S_H	S_h	S_v	
1	148.30	1.32	1.32		8.22	6.32		12.05	6.32	3.93	N11°E
2	184.10	1.67	1.67	15.36	11.53	8.31	3.83	15.08	8.31	4.88	N47°W
3	208.90	1.92	1.92	15.16	10.31	7.40	4.85	13.82	7.40	5.54	N82°W
4	212.92	1.96	1.96	11.57	7.18	6.39	4.39	12.43	5.66	5.64	
5	225.68	2.09	2.09	12.09	8.21	7.77	3.88	17.19	7.77	5.98	
6	251.65	2.35	2.35	17.16	12.49	9.69	4.67	18.93	9.69	6.67	
7	305.88	2.89	2.89	12.67	7.03	6.83	5.64	16.36	6.83	8.11	N54°W
8	335.28	3.19	3.19	14.92	10.23	9.17	4.69	20.46	9.17	8.88	
9	380.68	3.64	3.64	12.71	8.30	7.12	4.41	16.70	7.12	10.09	
10	415.26	3.99	3.99		11.66	10.49		23.79	10.49	11.00	
11	449.50	4.33	4.33		11.88	9.78		21.78	9.78	11.91	N78°W
12	468.68	4.52	4.52	16.85	13.41	10.44	3.44	22.43	10.44	12.42	
13	475.03	4.58	4.58	17.93	14.78	12.66	3.15	27.79	12.66	12.59	
14	511.30	4.95	4.95	19.68	14.71	12.76	4.97	28.51	12.76	13.55	
15	543.50	5.27	5.27	16.69	12.31	11.13	4.38	26.34	11.13	14.40	N62°W
16	562.00	5.45	5.45	15.84	10.41	9.61	5.43	23.88	9.61	14.89	
17	582.32	5.66	5.66		14.00	12.27		28.46	12.27	15.43	
18	590.32	5.74	5.74	16.08	12.18	10.68	3.90	25.59	10.68	15.64	

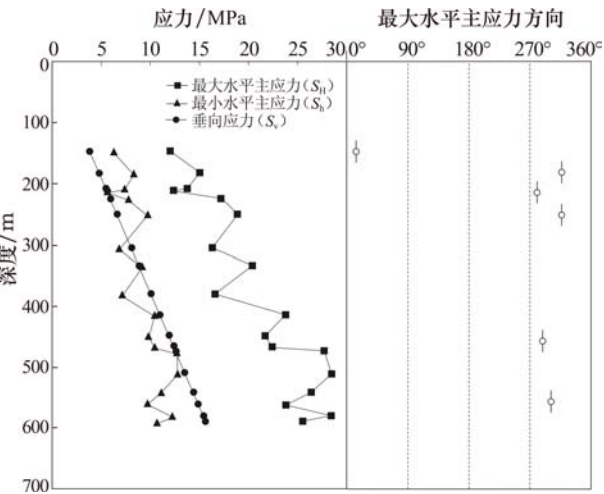


图 12 河北省迁安市主应力状态随深度变化趋势
Fig. 12 The variation trend of principal stress state at Qianan City in Hebei Province

2.2.4 辽宁省盖州市现今原位地应力绝对测量结果分析

该现今原位地应力绝对测量钻孔位于辽宁省盖州市杨运镇(GPS: E122°17'34", N40°06'46") (图 13), 现今原位地应力绝对测量目标层岩性为燕山中期中粗粒花岗岩, 钻孔深度为 600 m。2013 年 5 月 16—22 日在该钻孔随深度进行了系统的水压致裂原位地应力绝对测量^[6] (表 6, 图 14)。从原位地应力绝对测量结果可以看出, 日本 M_w 9.0 级大地震后 26 月左右的时间, 盖州市及其周围地区最大水平主压应力平均优势方位 (近 EW 方向) 已基本调整恢复到日本大地震前的现代地应力环境。值得注意的是, 最大、最小水平主应力和垂直应力大小差异不大, 尤其是最大水平主应力和垂直应力大小相近, 最大剪应力较小, 这也说明日本大地震在东北地区诱发的拉张效应调整基本结束或结束不久。

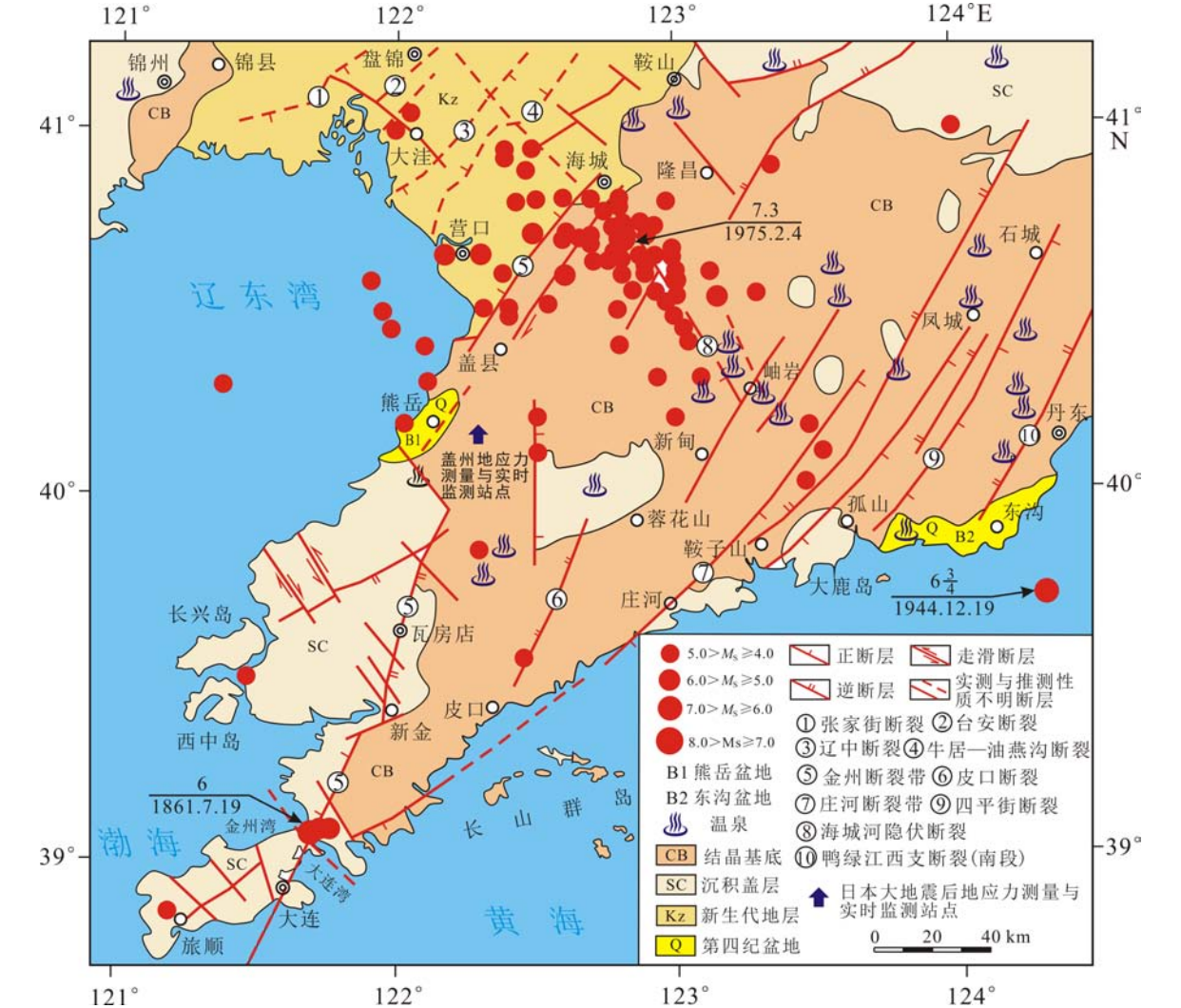


图 13 辽东半岛地震构造及地应力测量与实时监测站点位置图
(据文献[5]修编)

Fig. 13 The sketch map for seismotectonics and crustal stress measuring and real-time monitoring station location in Liaodong peninsula

表 6 辽宁省盖州市水压致裂现今原位地应力绝对测量压力参数及计算结果

Table 6 The hydrofracturing parameters and its calculating results of in-situ absolute crustal stress measuring by hydrofracturing method at Gaizhou City in Liaoning Province

测段 序号	测段中心 深度/m	压裂参数/MPa						主应力大小/MPa			S_H 方向/(°)
		p_H	p_o	p_b	p_r	p_s	T	S_H	S_h	S_v	
1	63.48	0.63	0.63	13.48	5.49	3.98	7.99	5.82	3.98	1.68	N54°E
2	83.44	0.83	0.83	10.99	3.88	3.10	7.11	4.59	3.10	2.21	
3	86.76	0.87	0.87	12.34	2.85	2.48	9.49	3.72	2.48	2.30	
4	89.26	0.89	0.89	12.36	2.38	2.04	9.98	2.85	2.04	2.37	
5	110.39	1.10	1.10	13.57	4.72	3.40	8.85	4.38	3.40	2.93	
6	121.63	1.22	1.22	12.61	5.39	3.72	7.22	4.55	3.72	3.22	N53°E
7	141.10	1.41	1.41	11.32	3.03	2.66	8.29	3.54	2.66	3.74	
8	164.35	1.64	1.64	13.05	4.73	4.00	8.32	5.63	4.00	4.36	
9	189.50	1.90	1.90	13.34	7.38	5.13	5.96	6.11	5.13	5.02	
10	209.60	2.10	2.10	18.69	8.43	7.46	10.26	11.85	7.46	5.55	
11	220.45	2.20	2.20	12.05	7.12	6.41	4.93	9.91	6.41	5.84	N55°E
12	234.13	2.34	2.34	15.34	8.04	6.35	7.30	8.67	6.35	6.20	
13	255.00	2.55	2.55	16.76	9.55	6.70	7.21	8.00	6.70	6.76	
14	279.60	2.80	2.80	15.77	6.69	5.58	9.08	7.25	5.58	7.41	
15	295.65	2.96	2.96	12.60	5.71	5.06	6.89	6.51	5.06	7.83	
16	305.81	3.06	3.06	17.38	6.05	4.90	11.33	5.59	4.90	8.10	N81°E
17	340.73	3.41	3.41	15.87	6.72	6.18	9.15	8.41	6.18	9.03	
18	342.73	3.43	3.43	16.94	6.68	6.34	10.26	8.91	6.34	9.08	
19	363.40	3.63	3.63	14.77	7.67	6.37	7.10	7.81	6.37	9.63	
20	382.20	3.82	3.82	21.89	9.89	8.54	12.00	11.91	8.54	10.13	
21	402.00	4.02	4.02	17.16	8.94	7.10	8.22	8.34	7.10	10.65	N57°E
22	444.90	4.45	4.45	16.29	8.85	7.66	7.44	9.68	7.66	11.79	
23	466.48	4.66	4.66	16.68	13.00	11.14	3.68	15.76	11.14	12.36	
24	483.71	4.84	4.84	22.25	10.06	9.78	12.19	14.44	9.78	12.82	
25	513.27	5.13	5.13	13.00	8.14	7.25	4.86	8.48	7.25	13.60	
26	532.20	5.32	5.32	17.90	8.30	7.60	9.60	9.18	7.60	14.10	N68°E
27	553.90	5.54	5.54	17.82	8.65	7.88	9.17	9.45	7.88	14.68	

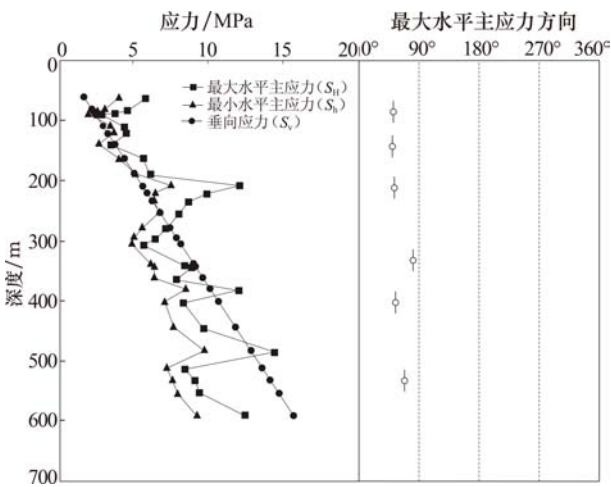


图 14 辽宁省盖州市主应力状态随深度变化趋势
Fig. 14 The variation trend of principal stress state at Gaizhou City in Liaoning Province

3 华北和东北地区 GPS 测量研究成果梳理分析

为了验证原位地应力绝对测量和实时监测结果的有效性和科学性,对已有 GPS 测量研究成果分为山东半岛、华北北部地区和东北地区 3 个范围进行梳理分析。

3.1 山东半岛 GPS 测量结果分析

殷海涛等^[13]以山东地壳运动 GPS 观测网为基础,结合周边 IGS 提供的全球 GPS 观测资料,计算了 2011 年 3 月 11 日发生的日本 9.0 级大地震对山东所处地块产生的影响,并给出了该地区站点的真实运动轨迹和运动方式。结果显示:山东各 GPS 基准站受地震波影响产生的震时最大振幅超过 0.2 m,持续时

间约 160 s;同震位移方向为南东东向,位移量最大超过 10 mm。日本 9.0 级地震对山东所在地块的影响主要在水平方向,对垂直方向影响不大,它对山东主要断裂带——沂沭断裂带起到了拉张的作用,且北段幅度明显大于南段。根据地震前后站点时间序列的发展趋势来看,近期山东所处地块处于向西回调运动状态,推测震后 3~5 个月左右将恢复到震前的轨迹。该研究成果验证了 2011 年 9 月山东省平度市现今原位地应力绝对测量结果的可靠性。

3.2 华北北部地区 GPS 测量结果分析

陈为涛等^[11]研究认为,华北北部地区的张家口—蓬莱断裂带,虽然在地震后约 1 年时期内表现为右旋挤压运动,但随后则快速回归到原有的左旋拉张运动,反映出这次地震的发生使该断裂的应力积累首先得到短暂的释放,随后区域应力又回归到原有水平,反映了华北北部地区日本大地震之前现代构造应力场、日本大地震之后张性效应调整期和调整期之后现今构造应力场最大水平主压应力优势方位分别为 NEE 方向、NNW 方向和 NEE 方向,这与日本大地震之前华北北部地区现今原位地应力绝对测量、昌黎地应力实时监测及 2012 年 6 月和 2013 年 8 月在滦南县和迁安市先后开展的现今原位地应力绝对测量等结果基本吻合。

3.3 东北地区 GPS 测量结果分析

陈为涛等^[11]利用一系列跨断裂连续 GPS 基线端点相对位置的时间变化序列进行分析,发现该地震使郯庐断裂北段发生了明显的左旋错动和拉张运动,且震后的变化趋势反映着轻微的继续左旋和拉张。

王敏等^[12]据覆盖日本全境的 GEONET 网络 GPS 观测资料研究表明,2011 年 3 月 11 日的日本宫城 M_w 9.0 级地震造成日本半岛向东移动,最大达到了 5.3 m。利用国家重大科技基础设施项目“中国大陆构造环境监测网络”的 GPS 观测资料,分析此次地震对中国大陆构造形变场的同震影响,结果显示,地震造成我国东北和华北地区产生毫米至厘米级的同震水平位移,最大值为 35 mm。通过应变分析发现,地震导致东北和华北地区一系列北北东走向的断裂产生了不同程度的张性应变。

在撰写该论文时,陈为涛博士对其所发论文之后新的 GPS 站点时间序列测量结果进行了补充分析,认为东北地区张性应变效应直到 2012 年 12 月 31 日仍未结束。需要说明的是,关于 2013 年以来

的 GPS 测量数据,由于客观原因未能获得。该认识为 2013 年 5 月盖州市和东北地区相关原位现今地应力绝对测量结果^①初步证实。

4 日本 M_w 9.0 级大地震前后华北和东北地区现今构造应力作用调整过程研究意义探讨

综上所述,关于日本大地震诱发同震位移在华北和东北地区所产生的张性效应调整周期与区域构造应力场演化过程可概括如表 7 所示。

从图 8 可以看出,在区域构造应力作用方向转换的过程中可能会诱发重大地质事件发生,如地震等,2012 年 5 月 28 日和 29 日、6 月 18 日、8 月 26 日及 2013 年 1 月 11 日在唐山及其周围地区分别发生的 4.8 级(39.7°N,118.5°E)、3.2 级(39.8°N,118.5°E)、4.0 级(39.6°N,117.6°E)、3.3 级(39.6°N,117.4°E)和 3.0 级(39.6°N,118.8°E)地震^②或许与华北北部地区构造应力作用方式和构造应力场转换有关。由此我们分析推断 2013 年 10 月 31 日以来在吉林省松原市发生的地震群^③(44.6°~44.7°N,124.0°~124.3°E)应与东北地区构造应力作用方式和构造应力场转换有关,而不是一个大地震前的小震群,并且 2013 年 10 月 31 日所发生地震的震源机制解^③也反映该地区已调整恢复到日本大地震前的现代地应力环境。这一认识的获得对于地震地质研究和地震预测预报具有重要意义。

通过上述研究分析,对松原地震群为什么会在这个时期发生以及其发生的动力学机制基本有了初步认识,并需要时间的进一步检验。关于为什么会在松原市发生小震群?笔者认为,可能与在太平洋板块向欧亚板块俯冲过程中松辽盆地的形成演化有关^[14-18],并需要进一步开展地壳深部结构构造及松辽盆地形成演化研究。

① 2012 年 9 月和 2013 年 5 月中国地质科学院地质力学研究所张春山研究员在长白山地区现今原位地应力绝对测量结果表明:2012 年 9 月长白山地区原位地应力绝对测量最大水平主应力优势方位为 NNW 向,反映了日本大地震后张性效应调整期区域构造应力作用方位;而 2013 年 5 月长白山地区原位地应力绝对测量最大水平主应力优势方位为近 EW 向,反映东北地区已恢复到日本大地震前的现代构造应力环境。由于该成果尚未公开出版,不便直接引用,在征得成果产权人的同意后,在此脚注说明。

② <http://www.ceic.ac.cn/>

③ http://www.csndmc.ac.cn/newweb/data/hrv_cmt_p002.jsp

表 7 日本大地震诱发同震位移所产生的张性效应调整周期与区域构造应力场演化过程

Table 7 The adjusting periods of the tensile effect triggered by Japan big earthquake coseismic displacement and the evolution processes of regional tectonic stress field

地区	方法技术	区域最大水平主压应力方向			整周期	最终确定的调整周期
		日本大地震之前	张性效应调整期	张性效应调整期之后		
山东半岛	原位地应力绝对测量	NEE		NEE	6 个月	6 个月左右(即调整结束时间大约在 2011 年 9 月)
	GPS 测量	NEE	NNW	NEE	3~5 个月	
华北北部地区	地应力实时监测		NNW	NEE	15 个月左右	15 个月左右(即调整结束时间大约在 2012 年 6 月)
	原位地应力绝对测量	NEE		NEE	15 个月左右	
	GPS 测量	NEE	NNW	NEE	12 个月左右	
东北地区	原位地应力绝对测量	NEE	NNW	NEE	26 个月左右	26 个月左右(即调整结束时间大约在 2013 年 5 月)
	GPS 测量	NEE	NNW		2012 年 12 月尚未结束	

5 结论

关于日本 M_w 9.0 级大地震前后华北和东北地区现今构造应力作用调整过程与研究意义,初步认识如下:

(1)华北和东北地区原位现今地应力绝对测量与实时监测和 GPS 测量研究结果表明:日本大地震在山东半岛、华北北部地区和东北地区所诱发的张性效应调整周期分别约为 6 个月(即调整结束时间大约在 2011 年 9 月)、15 个月(即调整结束时间大约在 2012 年 6 月)和 26 个月(即调整结束时间大约在 2013 年 5 月),张性效应调整周期与同震位移大小成正比。

(2)华北和东北地区日本大地震之前现代构造应力场、日本大地震之后张性效应调整期和调整期之后现今构造应力场最大水平主压应力优势方位分别为 NEE 方向、NNW 方向和 NEE 方向,并且随着这种张性效应调整周期的结束后时间的发展,水平主应力在测量深度范围逐步起主导作用。

(3)在区域构造应力作用方式和构造应力场转换过程中,可能诱发重大地质事件(如地震等)的发生。区域构造应力作用方式和构造应力场转换可能是地震发生的内动力机制之一。

(4)2012 年 5 月 28 日和 29 日、6 月 18 日、8 月 26 日及 2013 年 1 月 11 日在唐山及其周围地区分

别发生的 4.8 级、3.2 级、4.0 级、3.3 级和 3.0 级地震与华北北部地区构造应力作用方式和构造应力场转换有关。

(5)2013 年 10 月 31 日以来在吉林省松原市发生的地震群应与东北地区构造应力作用方式和构造应力场转换有关,而非一个大地震前的小震群。

由于受到地震发生的复杂性和国内外目前地震研究水平的制约,上述认识仍需华北和东北地区原位地应力绝对测量与实时监测、震源机制解、2013 年以来 GPS 测量、地震发震构造等研究成果以及其他相关研究方法^[19-20]的进一步检验和完善。

在论文的编写过程中,有关 GPS 测量方面的研究成果和分析得到中国地震局地质研究所邓起东院士、王敏研究员、甘卫军研究员和陈为涛博士以及山东省地震局殷海涛博士的大力帮助和支持,一并表示衷心的感谢!

参考文献

[1] Lin W R, Marianne C, Moore J C, et al. Stress state in the largest displacement area of the 2011 Tohoku-oki earthquake [J]. Science, 2013, 339: 687-690.

[2] Liao C T, Zhang C S, Wu M L, et al. Stress change near the Kunlun fault before and after the M_s 8.1 Kunlun earthquake [J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30 (20): 2027-2030.

[3] 郭啟良, 王成虎, 马洪生, 等. 汶川 M_s 8.0 级大震前后的水压致裂原地应力测量[J]. 地球物理学报, 2009, 52(5):

- 1395-1401.
- [4] 谢富仁,陈群策,崔效锋,等. 中国大陆地壳应力环境研究[M]. 北京:地质出版社,2003.
- [5] 《中国岩石圈动力学图集》编委会. 中国岩石圈动力学图集[M]. 北京:中国地图出版社,1989.
- [6] Haimson B C, Cornet F H. ISRM suggested methods for rock stress estimation: Part 3. Hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF) [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2003, 40: 1011-1020.
- [7] 李四光. 地震地质[M]. 北京:科学出版社,1973.
- [8] 李四光. 论地震[M]. 北京:地质出版社,1977.
- [9] 谭成轩,秦向辉,王瑞江,等. 中国大陆中东部 $M_s \geq 8.0$ 级特大地震发震背景初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊2): 3598-3607.
- [10] 张鹏,秦向辉,丰成君,等. 郯庐断裂带山东段深孔地应力测量及其现今活动性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2329-2334.
- [11] 陈为涛,甘卫军,肖根如,等. 3·11日本大地震对中国东北地区地壳形变态势的影响[J]. 地震地质, 2012, 34(3): 425-439.
- [12] 王敏,李强,王凡,等. 全球定位系统测定的2011年日本宫城 $M_w 9.0$ 级地震远场同震位移[J]. 科学通报, 2011, 56(20): 1593-1596.
- [13] 殷海涛,甘卫军,黄蓓,等. 日本 $M 9.0$ 级巨震对山东地区地壳活动的影响研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1497-1505.
- [14] 葛荣峰,张庆龙,王良书,等. 松辽盆地构造演化与中国东部构造体制转换[J]. 地质论评, 2010, 56(2): 180-195.
- [15] 胡望水,吕炳全,张文军,等. 松辽盆地构造演化及成盆动力学探讨[J]. 地质科学, 2005, 40(1): 16-31.
- [16] 李娟,舒良树. 松辽盆地中、新生代构造特征及其演化[J]. 南京大学学报:自然科学版, 2002, 38(4): 525-531.
- [17] 汪新文,刘友元. 东北地区前中生代构造演化及其与晚中生代盆地发育的关系[J]. 现代地质, 1997, 11(4): 434-443.
- [18] 王五力,付俊彧,杨雅军. 中国东北晚中生代—新生代盆山体构造演化及成因探讨[J]. 地质与资源, 2012, 21(1): 17-26.
- [19] 曾佐勋,王杰. 芦山地震:一个成功的中期预测案例[J]. 地学前缘, 2013, 20(3): 21-24.
- [20] 李德威,陈桂凡,陈继乐,等. 地震预测:从芦山地震到大陆地震[J]. 地学前缘, 2013, 20(3): 1-10.